

河西干旱区白芍养分吸收规律及其与药效成分积累的关系

张英英^{1,2,3}, 吴之涛^{1,2,3}, 杨宪忠^{1,2,3}, 魏玉杰^{1,2,3*}, 杜雷超¹, 吴芳¹

(1 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃武威 733006; 2 甘肃省特种药源植物种质创新与安全利用重点实验室, 甘肃武威 733006; 3 武威市祁连山区道地中药材生态栽培技术创新中心, 甘肃武威 733006)

摘要:为揭示河西干旱区白芍干物质积累及营养元素吸收特征和药效成分积累规律,明确影响药效成分积累的营养元素种类,科学制定白芍施肥方案和规范化种植,以甘肃省古浪县古丰镇芍药产业基地4年生白芍为研究对象,通过田间试验测定白芍不同生长期干物质积累特征以及根中9个营养元素含量和3类药效成分含量,并分析白芍根中有效成分含量与营养元素的相关性。结果表明,(1)随着生育期延续,白芍根部干物质积累先下降后上升,全株干物质积累量逐渐增加,出苗后90~130 d是白芍干物质积累最快的时期,占总积累量的79.29%,是白芍生长的关键时期。(2)白芍地上部氮、钾含量总体呈下降趋势,而磷素含量总体呈明显增加趋势,而根部氮、磷含量总体呈减少趋势,钾含量变化不明显;地上部和根氮累积总量分别在出苗后130 d和150 d达到最高,地上部磷积累量在出苗后150 d达到最大,根部磷积累量分别在出苗后30 d、150 d达到高峰,地上部和根部钾积累量分别在出苗后70 d和150 d达到高峰。地上部氮、钾含量在不同生长时期均高于根部,其磷含量则在出苗后90 d前低于根部,在出苗后110 d后高于根部。(3)白芍根中芍药苷、芍药内酯苷积累量均先升高后降低,最后趋于稳定,多糖积累量表现为高一低一高的变化趋势。(4)芍药苷含量与氮、钙、铜含量均呈极显著正相关,与钾含量呈显著正相关,芍药内酯苷含量与氮、钾、钙、铜含量均呈极显著正相关,而芍药多糖与各营养元素含量之间没有相关性。可见,白芍氮、磷、钾营养最大效率期在出苗后110~150 d,适时追加氮、钾肥有利于根部生物量的积累,施肥中添加Ca、Cu元素能有效促进白芍药效成分的积累;河西凉爽山区白芍宜在9月中下旬(9月16日以后)采挖。

关键词:河西干旱区;白芍;干物质积累特征;养分吸收;中微量元素;药效成分

中图分类号:Q945; S567

文献标志码:A

Nutrient Uptake Characteristics and Their Relationships with Accumulation of Medicinal Composition of *Paeonia lactiflora* in the Arid Region of Hexi

ZHANG Yingying^{1,2,3}, WU Zhitao^{1,2,3}, YANG Xianzhong^{1,2,3},
WEI Yujie^{1,2,3*}, DU Leichao¹, WU Fang¹

(1 Gansu Academy of Agri-Engineering Technology, Wuwei, Gansu 733006, China; 2 Key Laboratory of the Special Medicine Source Plant for Germplasm Innovation and Safety Utilization in Gansu Province, Wuwei, Gansu 733006, China; 3 Wuwei Technology Innovation Center of Genuine Medicinal Materials Ecological Cultivation in Qilian Mountain Area, Wuwei, Gansu 733006, China)

收稿日期:2023-06-14;修改稿收到日期:2023-10-06

基金项目:财政部、农业农村部“国家中药材产业技术体系项目(CARS-21)”;甘肃省技术创新引导计划项目-民生科技专项(21CX6NA024);甘肃省自然科学基金项目(23JRRH0002)

作者简介:张英英(1991—),女,硕士,助理研究员,主要从事土壤生态与中药材栽培研究。E-mail:495285884@qq.com

*通信作者:魏玉杰,博士,研究员,主要从事中药材栽培与新品种选育研究。E-mail:gswwwwj67@163.com

Abstract: The authors studied the rules of nutrient absorption and their relationships with the accumulation of medicinal composition, in order to clarify the types of nutrient elements that affect the accumulation of medicinal components and provide a theoretical basis for the scientific formulation of fertilization plans and standardized planting of *Paeonia lactiflora* in the Hexi region. The 4-year-old *P. lactiflora* were taken as the research material in Gufeng Town, Gulang County, Gansu Province. The dry matter accumulation characteristics, nine nutrient elements and three types of medicinal compositions of *P. lactiflora* at different growth stages were studied, and the correlation between the content of effective components in *P. lactiflora* and nutrient elements was explored with field experiments. The results showed that the accumulation of dry matter in the roots of *P. lactiflora* showed a trend of first decreasing and then increasing. The dry matter of the entire plant of *P. lactiflora* gradually increased with the growth period, and the period of 90 days to 130 days after emergence was the fastest period for dry matter accumulation, accounting for 79.29% of the total accumulation. It was a critical period for the growth of *P. lactiflora*. The nitrogen and potassium contents showed decreasing trend, while the phosphorus content showed significant increasing trend in the aboveground parts of *P. lactiflora* at different growth stages. The nitrogen and phosphorus contents showed decreasing trend in the roots, while the potassium content changed little. The total accumulation of aboveground and root nitrogen reached their highest levels at 130 days and 150 days after emergence, respectively. The accumulation of aboveground phosphorus reached its maximum at 150 days, while the accumulation of root phosphorus reached its peak at 30 days and 150 days after emergence. The accumulation of aboveground potassium reached its maximum at 70 days and the accumulation of root potassium reached its peak at 150 days after emergence. The nitrogen and potassium contents in the aboveground parts were higher than those in the roots at different growth stages, while the phosphorus content was lower than the roots before 90 days and higher than the roots after 110 days after emergence. The accumulation of paeoniflorin and albiflorin in roots first increased, then decreased, and finally stabilized. The accumulation of polysaccharides showed a trend of high-low-high. The content of paeoniflorin was highly significantly positively correlated with nitrogen, calcium, and copper contents, and significantly positively correlated with potassium content. The content of albiflorin was highly significantly positively correlated with nitrogen, potassium, calcium, and copper contents, while there was no correlation between polysaccharide and various nutrients. The maximum efficiency period of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrition was 110–150 days after emergence. Nitrogen and potassium fertilizers were beneficial for the accumulation of root biomass. Adding Ca and Cu elements to fertilization could effectively promote the accumulation of effective components in *P. lactiflora*. *P. lactiflora* should be harvested in the cold and cool mountainous areas of Hexi in mid to late September (after 16th September).

Key words: Hexi arid area; *Paeonia lactiflora*; characteristics of dry matter accumulation; nutrient absorption pattern; medium and trace elements; medicinal composition

白芍(*Paeonia lactiflora* Pall.)为毛茛科芍药属多年生草本植物,能镇痛、祛瘀、通经,具有养血敛阴,柔肝止痛,养血调经等功效^[1],对于头痛眩晕、血虚萎黄、月经不调等具有良好治疗效果,属于中国大宗常用药材。白芍中的化学成分包括单萜类、苷类、三萜类、黄酮类、鞣质类以及多糖类化合物,芍药苷、芍药内酯苷等单萜及其苷类化合物是主要活性成分^[2]。白芍主产区主要在安徽亳州、浙江磐安、四川中江和山东菏泽^[3],随着中药材产业日益发展壮大,市场需求不断增加,但野生道地资源大幅减少,供需矛盾日渐突出,人工栽培白芍已在中药材市场占据主要地位。白芍药性温和、喜光,且耐寒性强,在-20℃能露地越冬,白芍栽培出现北移趋势,已在

甘肃多地广泛种植,但如何实行科学施肥和规范化栽培,明确不同时期白芍养分吸收规律及分配特征是科学施肥和研制配方专用肥的重要基础。相关研究表明,中药材有效成分含量、品质及产量受栽培技术等条件特别是施肥技术的影响较大^[4-6],目前对于根茎类药用植物养分吸收规律及有效成分积累特征的研究主要集中在黄芪、当归、射干、远志等中药材^[7-10],而关于河西地区白芍营养吸收规律及其与主要药效成分形成和积累的关系尚缺乏系统研究。因此,本研究以4年生白芍为研究对象,通过测定白芍出苗后不同生长期干物质积累、营养元素及药效成分含量,探明河西地区白芍干物质积累及营养元素吸收特征和药效成分累积规律,明确影响药效成

分积累的营养元素种类,以期为该地区科学制定白芍施肥方案和规范化种植提供理论依据,对河西地区白芍生态栽培具有重要指导意义。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省古浪县古丰镇芍药产业基地(N37° 24′17″,E102° 45′14″),属温带干旱气候,平均海拔高度 2 500 m,年降雨量 381 mm,蒸发量 2 292 mm,年平均气温 4.9 ℃,全年日照总时间为 2 852.3 h,无霜期 125 d。供试土壤 0—20 cm 基本性状:土壤 pH 7.7、有机质 38.6 g/kg、全氮 2.28 g/kg、碱解氮 204 mg/kg、有效磷 45.6 mg/kg、速效钾 136 mg/kg。

1.2 试验设计

供试材料为 4 年生安徽亳芍,种苗于 2019 年购置于安徽中药材市场,于 2019 年 9 月 10 日栽种,株行距 60 cm×40 cm,试验设 3 个重复,小区面积 80 m²(20 m×4 m),栽种后前 3 年田间管理措施均一致,2022 年 4 月 15 日(第 4 年)幼苗全部出苗后追施氮磷钾三元复混肥(N-P₂O₅-K₂O:14-16-15)750 kg/hm²,5 月中旬(白芍出苗后 30 d)第 1 次采样,之后每 20 d 采样 1 次,共采样 7 次。采样时间为早晨 8:00—9:00,每个小区采用 5 点随机采样法,挖取白芍完整植株,去掉泥土,编号后迅速装入取样袋,带回实验室测定单株地上部和根的干物质积累量。将白芍根及地上部分别粉碎,测定氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌、锰、铁营养元素及芍药苷、芍药内脂苷及芍药多糖 3 类药效成分的含量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 干物质积累量

出苗后定期取样,将样品根和地上部分开,用蒸馏水清洗植株表面泥土,洗净后用纸擦干表面水分,分别置于搪瓷托盘,于 105 ℃杀青 30 min 后,在 70 ℃烘干至恒重后,称取干重。

1.3.2 氮磷钾含量

用粉碎机将植物样品粉碎并过 2 mm 筛,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,测定白芍根及地上部氮、磷、钾含量。全氮用凯氏滴定法测定;全磷用钒钼黄比色法测定;全钾用火焰原子吸收分光光度法测定^[11]。

1.3.3 中微量元素含量

将植物样品在高温马弗炉 550 ℃下灰化后,用盐酸溶液溶解残渣并稀释定容,采用原子吸收分光

光度法测定白芍根及地上部样品中微量元素钙、镁、铜、锌、铁、锰的含量^[11]。

1.3.4 药效成分含量

(1)芍药苷含量:参考《中国药典》2020 版白芍测定方法测定,按干燥品计算芍药苷(C₂₃H₂₈O₁₁)含量。

(2)芍药苷内酯含量:参考《中国药典》2020 版白芍测定方法,以芍药苷对照品为参照,以其相应的峰为 S 峰,计算芍药苷的相对保留时间,其相对保留时间应在规定值的±5%范围之内。相对保留时间及校正因子见表 1,按干燥品计算芍药苷内酯含量。

(3)多糖含量:参考《中国药典》2020 版,称量白芍样品粉末约 1 g,加水 100 mL 后,加热回流 2 h,放冷,摇匀并离心;取上清液,加乙醇 7.5 mL,摇匀离心,取沉淀加水溶解,并稀释至刻度;摇匀后取 1 mL,加 0.2%蒽酮-硫酸溶液 4.0 mL,测定吸光度;按照标准曲线计算无水葡萄糖含量,计算结果按干燥品计算,多糖含量以无水葡萄糖(C₆H₁₂O₆)计。

1.3.5 数据分析

利用 Excel 2016 作图,SPSS 19.0 软件进行差异显著性及相关性分析。

表 1 相对保留时间及校正因子		
Table 1 Relative retention time and correction factor		
待测成分(峰) Component	相对保留时间 Relative retention time	校正因子 Correction factor
芍药内酯苷 Albiflorin	0.79	1.02
芍药苷 Paeoniflorin	1.00	1.00

2 结果与分析

2.1 白芍干物质积累动态变化特征

由图 1 可知,白芍地上部分干物质积累动态呈波浪形变化,在出苗 30~70 d 加快,出苗 70~110 d 放缓,干物质积累量略微下降,并在出苗 130 d 达到最大,而后缓慢下降,出苗后 130 d 时干物质显著高于除 70 d 以外的其他时期。白芍根部干物质积累总体呈现先降低后升高的趋势,在出苗后 70 d 为整个生育期最低值,显著低于其他时期,在出苗后 150 d 达到最大值。可见,白芍在生长前期以地上部干物质增长量较大,生长后期生长中心由地上部转移至根部。

白芍全株干物质积累量随生育期推进逐渐增加,并在出苗后 90~130 d 是干物质积累最快的时

期,占总积累量的 79.29%。经 Logistic 方程拟合分析,白芍全株干物质积累量从出苗到出苗后 44 d 处于缓慢增长期,出苗第 110 天出现增长拐点,拐点干物质积累量为 29 351.69 kg;在出苗后 110 d 后,干物质处于迅速增长期,是白芍生长的关键时期。

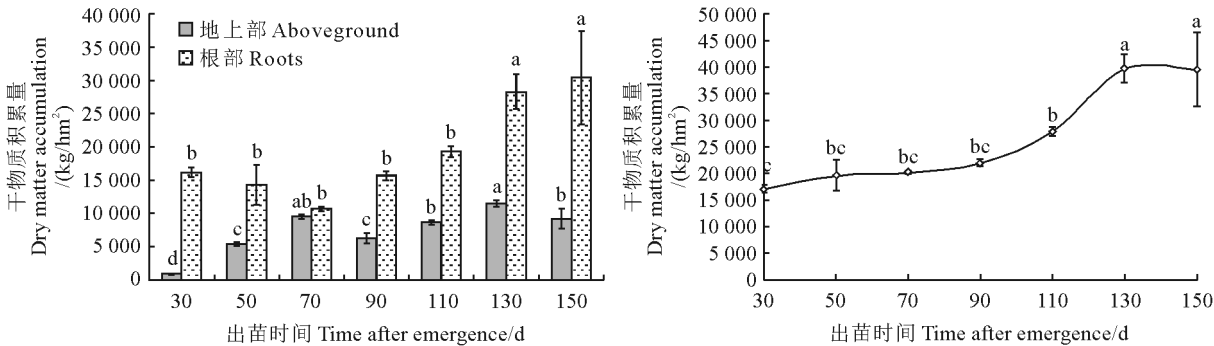
2.2 白芍氮、磷、钾含量及其积累量动态变化特征

2.2.1 氮含量及积累量

由图 2 可知,白芍地上部及根部氮素含量随着生长期延续总体呈下降的趋势,且始终表现为地上部高于根部。其中,地上部氮素含量呈明显下降趋势,在出苗后 30 d 显著高于其他生长时期,在出苗

后 150 d 最低(1.44%),而根部氮素含量则表现为先升高后下降、最终趋于平缓的变化趋势,在出苗后 70 d 达到最大(1.52%),在出苗后 30~70 d 呈增加趋势,在出苗后 70~150 d 呈下降趋势,且出苗后 30~70 d 显著高于 70~150 d。

同时,白芍地上部和根部对氮素积累量在不同生长时期存在较大差异。白芍地上部和根部氮素积累总量分别在出苗后第 130 天和第 150 天达到最高,分别达到 19 149.6,27 716.69 kg/hm² 在白芍出苗后的 110~130 d 根部氮积累量迅速增加,此时也是根部干物质积累的最大时期。



不同小写字母表示相同器官不同生育期之间差异显著(P<0.05)。下同。

图 1 白芍干物质积累动态变化

Different lowercase letters indicate significant difference between different reproductive stages of the same organ (P<0.05). The same below.

Fig. 1 Dynamic changes in dry matter accumulation of *P. lactiflora*

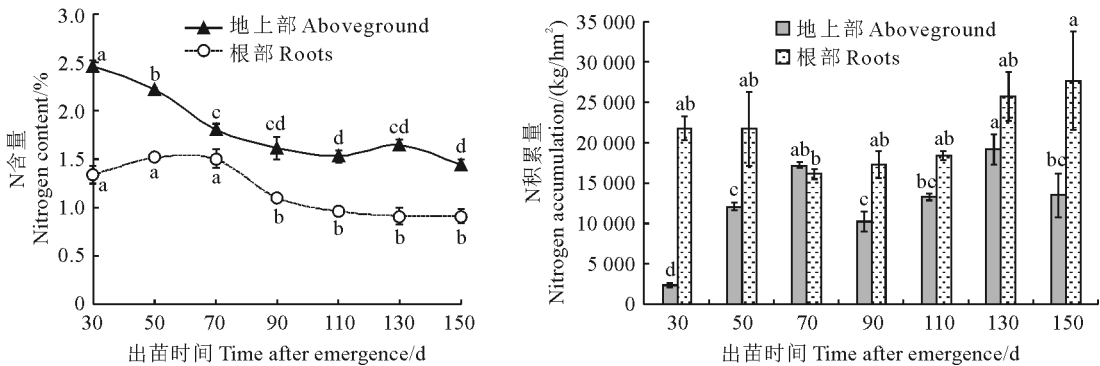


图 2 白芍根及地上部氮含量及积累量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in nitrogen content and accumulation in the roots and aboveground parts of *P. lactiflora*

2.2.2 磷含量及积累量

图 3 显示,白芍地上部磷素含量随着出苗天数的增加总体呈明显增加趋势,并在出苗后 150 d 达到最高(0.33%),显著高于其他生长时期,特别是出苗后 110~150 d 明显快速增加。白芍根部磷素含量随着出苗天数的增加总体呈明显下降趋势,在出苗后 30~50 d 从 0.50%快速下降至 0.18%,之后

趋于平缓波动变化,在出苗后 130 d 最低(0.12%)。白芍地上部磷素含量在出苗后 30~90 d 低于根部,在出苗后 110~150 d 高于根部。

同时,白芍不同生长时期地上部和根部对磷素积累量也存在较大差异。地上部磷素积累量随生长期推进呈增加趋势,在出苗后 150 d 达到最大(3 056.67 kg/hm²);根部磷素积累量则随着生长期

推进表现为先减少后增加的趋势,在出苗后 30 d 显著高于其他生长时期,随后大幅度快速下降,在出苗后 50~150 d 逐步积累,在出苗后 150 d 达到第二高峰(4 750.18 kg/hm²)。

2.2.3 钾含量及积累量

从图 4 来看,白芍地上部钾素含量随着生育期总体呈先明显下降后趋于平缓的趋势,在出苗后 30 d 显著高于其他生长时期,在出苗后 30~90 d 呈明显下降趋势,在出苗后 150 d 最低(0.35%);而白芍

根部钾素含量在不同生长期变化不明显,一直趋于平稳,处于 0.26%~0.40%之间;白芍地上部钾含量在不同生长期均大于根部,但随着生育期差距逐渐缩小,在出苗 70 d 以后已经非常接近。同时,白芍地上部和根部钾素积累量在不同生长时期存在明显差异,地上部钾素积累量随生长期推进呈先增加后减少趋势,在出苗后 70 d 达到最大(6 825.84 kg/hm²),而根部钾素积累量则随生长期推进整体呈增加的趋势,在出苗后 150 d 达到最大(10 363.66 kg/hm²)。

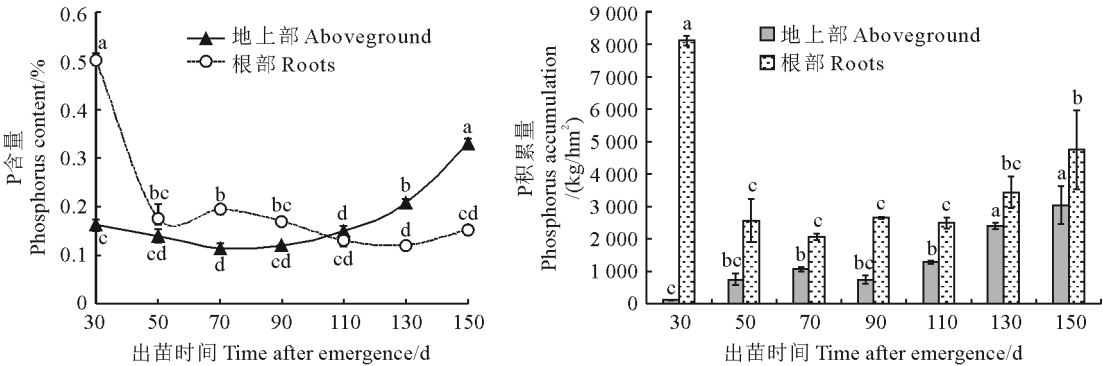


图 3 白芍根及地上部磷含量及积累量动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in phosphorus content and accumulation in the roots and aboveground parts of *P. lactiflora*

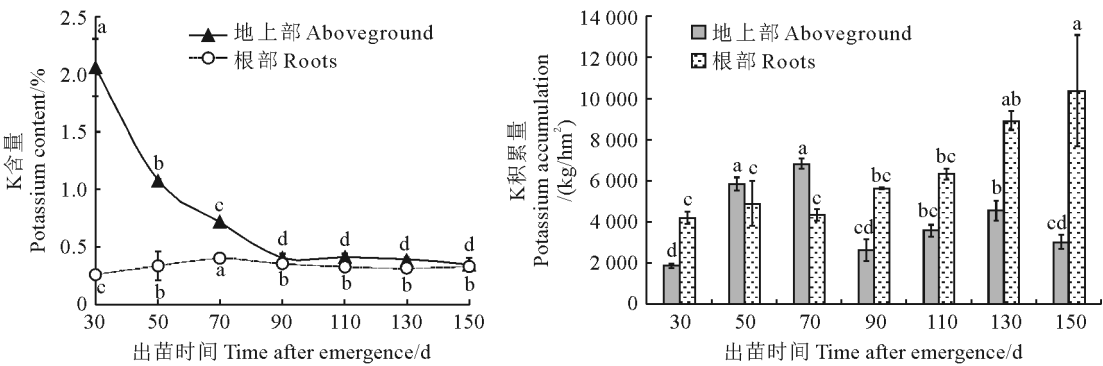


图 4 白芍根及地上部钾含量及积累量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes in potassium content and accumulation in the roots and aboveground parts of *P. lactiflora*

2.3 白芍根及地上部中微量元素含量动态变化特征

表 2 显示,白芍地上部及根部中微量元素含量均表现为 Ca>Mg>Fe>Zn>Mn>Cu;随着生长期延续,地上部 Ca 含量均在出苗后 30~130 d 显著增加后有所降低,Mg 含量则在 30~90 d 显著增加后降低;根部 Ca 含量表现为先升高后降低的趋势,并在出苗后 50 d 达到最大(14 824.33 mg/kg),Mg 含量在不同生长时期趋于稳定,基本没有变化。根部 Ca 含量在出苗前 70 d 高于地上部,出苗后 90~150 d 低于地上部;根部 Mg 含量除出苗后 30 d 高

于地上部外,其他生长阶段均低于地上部。

白芍地上部 Fe 含量随生长期推进表现为先降低后升高,在出苗后 150 d 达到最高(265 mg/kg),在出苗后 90 d 最低(144 mg/kg),而根部 Fe 含量则表现为持续显著下降的变化趋势。白芍地上部 Zn、Cu 含量随生育期变化均表现为一致的持续显著下降趋势,在出苗后 30 d 显著高于其他生长时期;而根部 Zn 含量呈先减后增的趋势,在出苗后 130 d 达到最大(13.53 mg/kg),根部 Cu 含量在出苗后 90 d 达到峰值(5.13 mg/kg)。白芍地上部 Mn 含量随

着生育期先升高后降低且出苗后 30 d 显著低于其他生长时期,根部 Mn 含量在出苗后 30~90 d 显著下降后有所上升并趋于平缓。白芍根部 Fe、Mn 含量均在出苗后 30 d 高于地上部,在后期均为低于地上部,但白芍 Zn、Cu 含量随生长发育推进在地下部与根部之间差异没有表现明显规律。白芍根系和地上部中微量元素含量随生长发育发生波动,可能与药效成分的生物合成规律有关。

2.4 白芍根药用有效成分含量及其积累量动态特征

图 5 显示,白芍根中芍药总苷、芍药内脂苷含量随生育期均呈现先增加后减少最后趋于稳定的趋势,它们的变化区间分别在 2.1%~4.4%和 0.6%~1.5%之间,多糖含量则表现为先增加后降低再大幅增加趋势,变化区间在 1.3%~12.1%之间,变化幅度明显大于前两者,在出苗后 150 d 显著高于其他时期。

表 2 不同生长时期白芍根及地上部中微量元素含量动态变化
Table 2 Dynamic changes in trace element contents in roots and aboveground parts of

<i>P. lactiflora</i> at different growth stages							mg/kg
出苗时间 Time after emergence /d	部位 Part	钙 Ca	镁 Mg	铁 Fe	锌 Zn	铜 Cu	锰 Mn
30	地上部 Aboveground	3 791.52±211.00e	1 701.79±24.42e	264.00±56.32a	40.23±0.66a	6.57±0.33a	21.00±2.65b
	根部 Roots	10 548.72±228.20b	2 064.80±68.36a	274.00±17.93a	11.17±0.43ab	2.10±0.35c	21.33±1.45a
50	地上部 Aboveground	6 568.88±250.82d	2 854.12±95.63d	260.33±28.17ab	22.90±2.36b	3.33±0.20b	36.33±1.20a
	根部 Roots	14 824.33±1 705.98a	1 920.70±78.62ab	157.00±21.22b	7.47±0.43b	3.17±0.35b	15.33±1.45b
70	地上部 Aboveground	11 824.73±860.94c	4 295.73±73.91c	194.67±33.72ab	13.63±0.22c	2.37±0.03c	36.67±3.84a
	根部 Roots	14 540.30±452.12a	1 727.09±137.84bc	111.00±4.16c	9.63±0.09ab	3.63±0.09b	11.00±0.00c
90	地上部 Aboveground	20 161.22±271.44b	7 576.85±202.81a	144.00±1.00b	8.80±1.04de	2.20±0.10c	32.33±1.76a
	根部 Roots	10 540.69±827.10b	1 828.62±199.57abc	72.00±7.62d	11.63±0.84ab	5.13±0.13a	8.33±0.33d
110	地上部 Aboveground	23 130.24±963.12a	7 221.28±378.88a	192.33±20.93ab	10.77±1.57cd	1.73±0.12c	36.33±4.18a
	根部 Roots	9 000.00±104.27bc	1 619.05±30.77bc	63.33±7.93d	10.33±2.62ab	2.03±0.15c	11.33±0.88c
130	地上部 Aboveground	25 306.21±892.79a	7 308.54±287.11a	193.67±23.21ab	7.40±0.85de	1.77±0.27c	41.00±6.02a
	根部 Roots	8 754.04±92.12bc	1 534.92±40.48c	60.00±4.93d	13.53±0.54a	1.43±0.15d	12.33±0.88c
150	地上部 Aboveground	23 800.40±1 682.05a	5 165.52±456.32b	265.00±50.06a	6.57±0.37e	2.30±0.25c	32.33±1.45a
	根部 Roots	7 974.19±225.68c	1 616.61±13.48bc	69.00±4.93d	10.03±0.54ab	1.70±0.15cd	12.00±0.58c

注:同列相同部位不同小写字母表示不同生长期存在显著性差异($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters within same column of same part indicate significant difference among different growth stages ($P<0.05$).

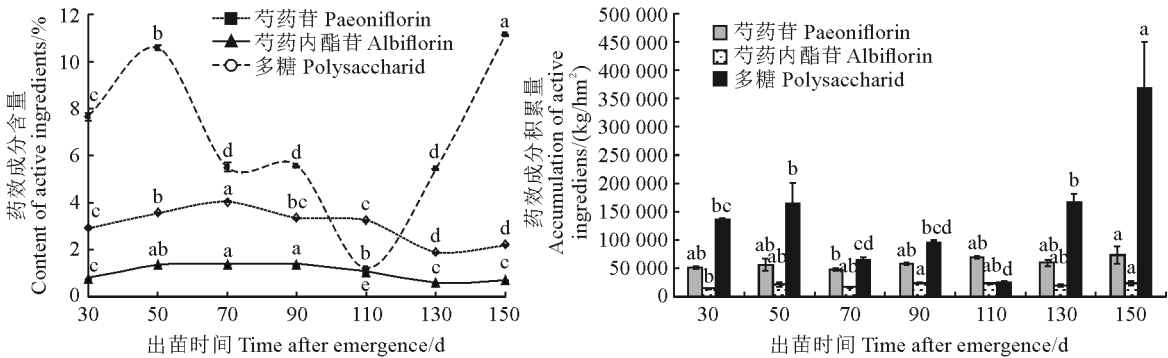


图 5 不同生长时期白芍根中有效成分含量及积累量动态变化
Fig. 5 Dynamic changes in the content and accumulation of effective components in the roots of *P. lactiflora* at different growth stages

同时,随着生长期的延续,白芍根 3 类药效成分中芍药苷、芍药内脂苷积累量的总变化趋势基本一致,均表现为先增加后趋于稳定,并在出苗后 150 d 达到最大值,分别为 72 981.34,24 327.11 kg/hm²;根中多糖积累量则表现为先增加后降低再大幅增加的变化趋势,在出苗后 150 d 最大(367 947.59 kg/hm²),显著高于其他时期。综合以上药效成分含量及积累特征来看,河西地区芍药应在出苗后 150 d(9 月中旬)进行采挖。

2.5 白芍根有效成分含量及营养元素含量的相关性分析

从表 3 可知,芍药根部氮含量与钙、铁含量呈极

显著正相关,与锌含量呈显著负相关;磷含量与镁、铁、锰含量均呈极显著正相关,与钾含量呈显著负向关;钾含量与铁、锰含量呈显著或极显著负相关,与铜含量呈显著正相关。中微量元素中,铁含量与镁含量呈极显著正相关,锰含量与镁、铁含量呈极显著正相关,其他营养元素之间均无显著相关性。

同时,芍药根部营养元素与药效成分芍药苷、芍药内脂苷、多糖含量之间的相关性分析结果(表 3)表明,芍药苷含量与氮、钙、铜含量均呈极显著正相关,与钾含量呈显著正相关;芍药内脂苷含量与氮、钾、钙、铜含量均呈极显著正相关;芍药多糖含量与各营养元素含量之间均没有显著相关性。

表 3 白芍根有效成分含量与营养元素含量的相关关系											
Table 3 Correlation between the content of effective ingredients and nutritional elements in the root of <i>P. lactiflora</i> (n=21)											
指标 Index	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	芍药苷 Paeoniflorin	芍药内脂苷 Albiflorin
P	0.407										
K	0.233	−0.529 *									
Ca	0.778 **	0.095	0.367								
Mg	0.389	0.578 **	−0.292	0.540 *							
Fe	0.579 **	0.904 **	−0.510 *	0.379	0.694 **						
Zn	−0.503 *	−0.003	−0.218	−0.311	0.018	−0.096					
Cu	0.41	−0.071	0.481 *	0.534 *	0.314	−0.022	−0.106				
Mn	0.311	0.808 **	−0.648 **	0.169	0.586 **	0.888 **	0.051	−0.394			
芍药苷 Paeoniflorin	0.715 **	0.062	0.475 *	0.765 **	0.338	0.194	−0.330	0.667 **	−0.078		
芍药内脂苷 Albiflorin	0.599 **	−0.169	0.580 **	0.725 **	0.256	−0.024	−0.315	0.836 **	−0.331	0.926 **	
多糖 Polysaccharid	0.254	0.188	−0.109	0.180	0.220	0.311	−0.271	−0.066	0.340	−0.306	−0.204

注: * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。
Note: * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$.

3 讨 论

干物质是光合作用产物积累的最高形式,是衡量有机物质、营养元素积累重要指标。本研究结果表明,白芍全株干物质随生育期推进逐渐增加,出苗后 90~130 d 是白芍干物质积累最快的时期,占总积累量的 79.29%。原因可能是生长前期以地上部增长量较大,生长后期生长中心由地上部转移至根部。由于白芍为多年生药用植物,经过前 3 年的生长,根部干物质不断积累,而出苗后根部营养不断向地上部转移,在出苗后 70 d 前,根部干物质积累有所降低,地上部不断积累,而出苗后 70 d,此时地上部分的光合面积逐渐趋于稳定,地上部营养物质不

断向根部转移,地上部生长放缓,根部干物质迅速积累后趋于稳定。张荣荣^[12]研究表明 4 年生亳芍在 9 月中下旬以后,根系干质量增长缓慢并趋于稳定,根系基本停止生长。这与本研究结果基本一致。

氮、磷、钾元素是植物生理代谢和生长必须的营养元素,研究白芍氮、磷、钾营养元素的动态变化及积累规律是充分挖掘白芍成药期养分需求特性的重要依据,也是科学合理施肥的基础保障。本研究结果表明白芍不同生长时期氮、磷、钾含量及积累量变化存在较大差异。出苗后是白芍地上部和地下部同步快速生长期,氮、钾元素积累量均在出苗后 70 d 达到较高水平,钾累积量在开花前达到第 1 个高峰,此时要维持较高的氮、钾含量来促进地上部生长,为后期营

养物质向根部转移提供营养基础。而磷积累量则表现出下降趋势,在出苗 90 d 后,白芍主要以根部干物质不断积累为主,根部氮、磷、钾元素不断积累,地上部磷元素也不断积累,可能是后期气温下降,植物靠积累磷不断提高自身抗性。据报道,油用牡丹萌芽期氮、磷、钾地下部积累量约为地上部 1 倍,植株萌发初期养分主要储存在根部,并随着生育期推进向地上部转移^[13];远志地上部含氮量始终高于根系^[10],莢膜黄芪茎叶和根系中的营养元素含量表现为氮>钾>磷^[14],这与本研究的结果一致。陈暄等^[15]研究认为,氮、磷、钾肥对不同种植年限的芍药生长均有影响,且 4 年生芍药受氮肥影响较明显。因此,需合理追施氮肥,促进地上部分的生长,使地上部养分向根部转移,为白芍根部干物质及药效成分累积提供有利保障。

微量元素对药用植物生长、根系营养调控、生理代谢及药用有效成分的积累和形成有举足轻重的作用。微量元素与中药药性存在相关,在一定程度上能反映中药性能^[16]。本研究结果表明白芍体内中微量元素含量表现为 Ca>Mg>Fe>Zn>Mn>Cu,芍药苷含量与氮、钙、铜含量均呈极显著正相关,与钾含量呈显著正相关,芍药内脂苷含量与氮、钾、钙、铜含量均呈极显著正相关;芍药多糖含量与各营养元素含量之间没有显著相关性,且中微量元素 Ca、Fe、Mg、Mn 含量与 N、K、P 含量元素之间存在显著或极显著正相关关系,微量元素能促进必需元素的吸收。陈暄等^[15]研究也认为少量施用 Mn、Fe、Zn、Cu 等微量元素,能显著促进芍药生长和提高根中芍药苷含量。同时,白芍中根中不同药用成分含量、微量元素含量之间存在一定的相关性。据报道,白芍根中芍药内酯苷含量与 Ba、Mn、Ga 含量均呈显著正相关,芍药内酯苷、芍药苷等含量与 B 含量显著相关^[17];亳芍中多糖含量与 Cu、Zn、Na 含量均呈正相关,与 Ba、Cr 含量呈负相关,与 Ca 含量没有显著相关性^[18],这与本研究结果存在一定差异,这可能跟土壤类型、海拔、气候、栽培方式等因素有关。

另外,半枝莲中野黄芩苷、总黄酮、多糖含量与 Zn、Mn 含量呈显著或极显著正相关^[19];甘草中甘草苷含量与 Mn、Pb 含量呈显著正相关,与 Cu、Na 含量呈显著负,甘草酸含量与 Mg、Cd、La 含量有显著正相关关系,与 Fe、K 含量呈显著负相关^[16];远志总黄酮含量、总酚含量与 Zn 含量呈显著或极显著正相关^[10];青蒿中青蒿素含量与 Fe 含量、Cu/Zn 之间存在相关性^[20]。由此可知,微量元素不仅参与中药材多种生理代谢活动,也影响着药效成分的结

构功能;中药药理活性是多组分协同作用,与中药有机成分、无机元素含量均密切相关,它们综合作用影响药效成分的形成和积累^[10,21-22]。

大多研究认为,芍药根中的芍药苷含量在花期最高,在 9—10 月趋于稳定,且芍药苷含量与根直径呈负相关^[23-25]。芍药中芍药甙含量在 9—11 月呈低-高-低的变化趋势,并以 10 月初含量最高^[24]。吴健等^[23]研究认为芍药苷含量在 7 月和 11—12 月出现高值,但 β -淀粉酶活性升高,不宜采收,可溶性糖在 10—11 月迅速积累,芍药的收获期在 9 月中旬至 10 月上旬为宜。本研究中白芍根中芍药苷、芍药内脂苷含量均在出苗后 70 d 达到最大(分别为 4.4%、1.5%),正值白芍开花盛期,随后下降,至 9 月中旬趋于稳定。陈乃东等^[26]认为亳芍多糖是葡萄糖、果糖、甘露糖等组成的杂多糖,栽培 3 年的亳芍多糖含量最高,品质最佳。本研究中芍药多糖含量呈高-低-高的变化趋势,整个生育期分别在出苗后 50 d 和 150 d 出现 2 次峰值,分别为 11.5% 和 12.1%。其原因可能是在白芍生长初期大量营养物质被用于营养生长,致使根部多糖积累;而在出苗后 50 d 开始大量营养物质向地上部转移,且高温不利于糖分积累,引起根中多糖含量呈下降趋势;出苗后 110 d 后,此时也是白芍干物质迅速积累的重要时期,根部生长迅速,根部多糖含量开始大量积累,白芍多糖积累与干物质积累趋势相一致。因此,结合当地的气候条件与本试验结果,建议河西冷凉山区白芍应该在 9 月中下旬(9 月 16 日以后)采挖。

4 结 论

白芍根部干物质积累随着生育期延续呈先下降后上升的趋势,其全株干物质积累量随生育期而逐渐增加,并在出苗后 90~130 d 是干物质积累最快的时期,占总积累量的 79.29%,是白芍生长的关键时期。白芍氮、磷、钾营养最大效率期在出苗后 110~150 d,应适时追加氮、磷、钾肥,以保证白芍光合作用及根部生物量的积累。白芍根中芍药苷含量与氮、钙、铜含量均呈极显著正相关,与钾含量呈显著正相关;芍药内脂苷含量与氮、钾、钙、铜含量均呈极显著正相关;芍药多糖含量与各营养元素含量之间没有显著相关性。2 类药效成分芍药苷、芍药内酯苷积累变化趋势基本一致,均为先升高后降低,最后趋于稳定;多糖积累量则表现为高-低-高的变化趋势。白芍经济产量在出苗后 150 d 达到最大值,建议生产中甘肃省河西冷凉山区在 9 月中下旬(9 月 16 日以后)进行采挖。

参考文献：

[1] 张建军, 李 伟, 王丽丽, 等. 赤芍和白芍品种、功效及临床应用述评[J]. 中国中药杂志, 2013, **38**(20): 3 595-3 601.
ZHANG J J, LI W, WANG L L, *et al.* Varieties, functions and clinical applications of Chishao and Baishao: A literature review[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, **38**(20): 3 595-3 601.

[2] 徐佳新, 许 浚, 曹 勇, 等. 中药白芍现代研究进展及其质量标志物的预测分析[J]. 中国中药杂志, 2021, **46**(21): 5 486-5 495.
XU J X, XU J, CAO Y, *et al.* Modern research progress of traditional Chinese medicine *Paeoniae Radix Alba* and prediction of its Q-markers[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2021, **46**(21): 5 486-5 495.

[3] 查良平, 杨 俊, 彭华胜, 等. 四大产地白芍的种质调查[J]. 中药材, 2011, **34**(7): 1 037-1 040.
ZHA L P, YANG J, PENG H S, *et al.* Germplasm investigation of *Paeonia lactiflora* in four producing areas[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2011, **34**(7): 1 037-1 040.

[4] 刘 杰, 张雄杰, 盛晋华, 等. 肥料类型对盐碱地蒙古黄芪生长与光合特征及药材产量和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(6): 1 012-1 018.
LIU J, ZHANG X J, SHENG J H, *et al.* Effects of fertilizer types on growth, photosynthesis, yield and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* in saline-alkali land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(6): 1 012-1 018.

[5] 张亚琴, 邓秋林, 文秋姝, 等. 浅谈科学施肥在中药材生态种植中的作用与措施[J]. 中国中药杂志, 2020, **45**(20): 4 846-4 852.
ZHANG Y Q, DENG Q L, WEN Q S, *et al.* Brief discussion about role and measures of scientific fertilization in ecological cultivation of Chinese medicinal materials[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, **45**(20): 4 846-4 852.

[6] 丁丹丹, 李西文, 陈士林, 等. 优质中药材栽培合理施肥探讨[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2018, **20**(7): 1 114-1 122.
DING D D, LI X W, CHEN S L, *et al.* Study on rational fertilization of high quality Chinese herbal medicines[J]. *World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica*, 2018, **20**(7): 1 114-1 122.

[7] 曹建军, 王长如, 梁宗锁, 等. 不同黄芪品种根中多糖的动态积累及多糖含量比较研究[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(6): 1 263-1 266.
CAO J J, WANG C R, LIANG Z S, *et al.* Dynamic accumulations and contents of root polysaccharides of different official *Astragalus* varieties[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(6): 1 263-1 266.

[8] 李林玉, 李庆堂, 高永萍, 等. 云当归物质积累和养分吸收规律研究[J]. 中药材, 2022, **45**(6): 1 311-1 315.
LI L Y, LI Q T, GAO Y P, *et al.* Study on dry matter accumulation and nutrient absorption of *Angelica yunnanensis*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, **45**(6): 1 311-1 315.

[9] 李金鑫, 刘 雨, 郭超伟, 等. 射干养分需求规律分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, **28**(23): 128-134.
LI J X, LIU Y, GUO C W, *et al.* Nutrient requirement pattern of *Belamcanda chinensis*[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, **28**(23): 128-134.

[10] 张 洁, 张 莹, 贾小云, 等. 远志养分吸收规律及其与药效成分积累的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(7): 1 230-1 238.
ZHANG J, ZHANG Y, JIA X Y, *et al.* Nutrient uptake rules of *Polygala tenuifolia* and its relationship with accumulation of bioactive components[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(7): 1 230-1 238.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[12] 张荣荣. 芍药生长发育及芍药苷和苯甲酸累积规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.

[13] 姜 利, 洪 娟, 陈法志, 等. 油用牡丹‘凤丹’不同生育期养分吸收和积累规律[J]. 经济林研究, 2022, **40**(1): 112-122.
JIANG L, HONG J, CHEN F Z, *et al.* Regularity of the adsorption and accumulation of nutrients at different growth stages of *Paeonia ostii* Fengdan[J]. *Non-Wood Forest Research*, 2022, **40**(1): 112-122.

[14] 王渭玲, 梁宗锁, 谭 勇. 膜荚黄芪干物质累积及氮、磷、钾吸收规律的研究[J]. 中国中药杂志, 2007, **32**(9): 789-793.
WANG W L, LIANG Z S, TAN Y. Study on accumulation of dry matter and absorption of N, P and K of *Astragalus membranaceus*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2007, **32**(9): 789-793.

[15] 陈 暄, 张雪媛, 张荣荣, 等. 锰、铁、锌、铜 4 种微量元素对芍药生长和芍药苷含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, **34**(8): 961-964.
CHEN X, ZHANG X Y, ZHANG R R, *et al.* Effects of Mn, Fe, Zn and Cu on growth and paeoniflorin content of *Paeonia lactiflora* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2009, **34**(8): 961-964.

[16] 刘长利, 尹 艳, 张淑华, 等. 中药甘草中微量元素与有效成分相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2014, **39**(17): 3 335-3 338.
LIU C L, YIN Y, ZHANG S H, *et al.* Study on correlation between trace elements and active ingredient in *Glycyrrhizae Radix et Rhizoma*[J]. *China Journal of Chinese Materia*

- Medica*, 2014, **39**(17): 3 335-3 338.
- [17] 刘 威, 王金玲, 胡军华, 等. 白芍药材中微量元素与有效成分含量相关性分析及灰色关联度评价[J]. 中华中医药杂志, 2015, **30**(5): 1 400-1 406.
- LIU W, WANG J L, HU J H, *et al.* Study on the relationship between trace elements and active ingredients in *Radix Paeoniae Alba* and evaluation of grey incidence degree[J]. *China Journal of Traditional Medicine and Pharmacy*, 2015, **30**(5): 1 400-1 406.
- [18] 姚厚军, 陈乃东, 陈乃富, 等. 不同栽培年限亳芍多糖与微量元素动态积累规律研究[J]. 生物学杂志, 2017, **34**(5): 66-69.
- YAO H J, CHEN N D, CHEN N F, *et al.* The dynamic accumulation of polysaccharide and trace elements from *Paeonia lactiflora* Pall. with different harvesting ages[J]. *Journal of Biology*, 2017, **34**(5): 66-69.
- [19] 范菊娣, 王 颖, 张 珏, 等. 半枝莲中微量元素与活性成分含量的量变分析[J]. 化学研究与应用, 2017, **29**(8): 1 164-1 170.
- FAN J D, WANG Y, ZHANG J, *et al.* Quantitative changes analysis between contents of active ingredients and trace elements in *Scutellaria barbata* D. Don[J]. *Chemical Research and Application*, 2017, **29**(8): 1 164-1 170.
- [20] 周 蓓, 武 暄, 蒋 勇, 等. 重庆产青蒿药材中微量元素与有效成分含量评价及其相关性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, **35**(10): 159-164.
- ZHOU B, WU X, JIANG Y, *et al.* Contents of nutrient elements and active ingredients in the medicinal material *Artemisia annua* produced in Youyang, Chongqing and their correlation analysis[J]. *Journal of Southwest University* (Natural Science Edition), 2013, **35**(10): 159-164.
- [21] 魏小成, 李成义, 周瑞娟, 等. 无机元素与中药关系研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2022, **29**(7): 140-144.
- WEI X C, LI C Y, ZHOU R J, *et al.* Research progress in relationship between inorganic elements and Chinese Materia Medica[J]. *Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine*, 2022, **29**(7): 140-144.
- [22] 李明利, 高文雅, 王宏洁, 等. 基于“经验-成分-活性-电子感官”的中药饮片质量综合评价体系的探讨[J]. 中国中药杂志, 2022, **47**(8): 1 995-2 007.
- LI M L, GAO W Y, WANG H J, *et al.* Comprehensive evaluation system for quality of Chinese medicinal decoction pieces based on “experience-ingredients -activity- electronic sensing”[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2022, **47**(8): 1 995-2 007.
- [23] 吴 健, 赵 亮, 张 钦, 等. 芍药最佳采收期研究[J]. 中国中药杂志, 2008, **33**(8): 952-954.
- WU J, ZHAO L, ZHANG Q, *et al.* Study on the best harvest time of *Paeonia lactiflora* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, **33**(8): 952-954.
- [24] 陈丙鑫, 杭悦宇, 周义锋, 等. 收获期芍药根中芍药甙含量动态变化[J]. 植物资源与环境学报, 2002, **11**(2): 25-28.
- CHEN B L, HANG Y Y, ZHOU Y F, *et al.* The dynamic change of paeoniaflorin content from *Paeonia lactiflora* Pall. root in harvest time[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2002, **11**(2): 25-28.
- [25] 金传山, 蔡一杰, 吴德玲. 不同采收期亳白芍中芍药苷与白芍总苷的含量变化[J]. 中药材, 2010, **33**(10): 1 548-1 550.
- JIN C S, CAI Y J, WU D L. Content changes of paeoniflorin and total glucosides of *Paeonia lactiflora* in different harvest periods[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2010, **33**(10): 1 548-1 550.
- [26] 陈乃东, 黄 成, 夏青阳, 等. 亳芍多糖的积累规律及其单糖组成 GC-MS 分析[J]. 药物分析杂志, 2016, **36**(8): 1 349-1 356.
- CHEN N D, HUANG C, XIA Q Y, *et al.* Accumulation of the polysaccharides in *Paeonia lactiflora* Pall. and the GC-MS analysis on its mono-sugar compositions [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2016, **36**(8): 1 349-1 356.

(编辑:裴阿卫)